

不均一照明下のイメージフロー評価に基づく3次元形状検出 —照明付き移動ロボットの視覚—

工藤 朋之¹ 原 貴史¹ 三池 秀敏² 野村 厚志³

¹ 電気電子工学専攻

² 感性デザイン工学

³ 山口県立大学国際文化学部国際文化学科 (山口市)

TVカメラをその光軸に垂直に等速並進運動させることで得られる動画像から、グラディエント法を用いて精度良く速度場を検出する場合、照明の不均一等、現実のシーンにおける様々な理想化し難い現象の影響を考慮しなければならない。本論文では、対象静止物体を自らの照明で照らしながら奥行き計測をする、夜間作業ロボットのための視覚システムを提案する。また、こうした視覚機能の実現に必要な勾配法の拡張について議論する。すなわち、照明の空間的不均一に左右されない勾配法の拡張した基本式を紹介するとともに、物体境界付近で問題となるオクルージョンを考慮した、局所最適化領域の時空間選択法の提案を行なっている。シミュレーション動画像を用いて提案した手法の有効性を確認するとともに、今後の問題点について議論する。

Key Words : *Image Flow, Non-uniform Illumination, Motion Boundary*

1. はじめに

画像からの3次元情報検出に種々の方法が提案されている。その一つに運動立体視 (shape from motion) と呼ばれる手法がある。この手法では、三次元世界とテレビカメラとの相対運動を捉えた動画像から、画面上における濃淡値の見かけの速度場 (オプティカルフロー) を検出し、これを利用した三次元世界の認識を行なう試み (運動立体視) [1][2] が盛んである。ロボットビジョンを念頭においた場合、視野に映る環境や物体形状、又それらまでの奥行きを知る上で速度場の精度良い情報が不可欠であろう。しかし、従来の代表的な手法であるマッチング法 [3] や勾配法 (グラディエント法) [4] では、実世界 (部屋の中や景色等のシーン) を対象とした場合、満足のゆく精度が得られていないのが現状である。その理由として下記のような現実のシーンにおける、種々の理想化し難い現象の存在があげられよう。

- (1) 照明の空間的、時間的变化の影響 [5]
- (2) オクルージョンの影響 [6]
- (3) 非剛体物体の運動 [7]
- (4) 拡散現象の影響 [8]
- (5) 多重フローの存在 [9]

本研究では上記の問題の幾つかを解決すべく以下のような目標の下に研究を行った。

- (1) 不均一照明下の映像からの三次元形状検出
- (2) オクルージョン、多重フローによる検出誤差への対応

オプティカルフロー検出に関して、著者らの研究グループでは、時空間相関法と呼ばれる固定観測領域における濃淡値の時間変化に着目した手法 [10] を提案してきた。最近更にこの考え方を進め、固定観測領域での濃淡値の総和の時間変化に注目して導かれる保存の式を参考に、勾配法の拡張された基本式を提案した [11]。この基本式を利用し、不均一照明条件下においても照明条件と、速度場に関して一定の知見が与えられている状況においては、速度場の精度良い検出が可能となることが示された [5]。しかし、この手法は流体現象を可視化したシーンにおける速度ベクトル場の高精度計測を目標として提案されてきた。本研究では、立体的な物体の形状計測や認識への応用とその可能性を探ることを目的とし、拡張した勾配法に基づき、夜間に行動する照明付き移動ロボットの視角システムを新たに提案する。

一方、(2)の課題に関しては、勾配法による速度場検出に利用される誤差関数を積極的に用いることでオクルージョン、多重フロー問題に関わる、運動境界で発生するオプティカルフローの検出誤差を少なくする手法を提案する。

2. 解析理論

(1) 一般化勾配法の基本式の導出

ここでは拡張した勾配法の基本式 [11] の導出を簡単に示し、不均一照明の影響に対応するよう拡張した拘束条件式 [5] を紹介する。

a) 濃淡値の保存式

流体の保存の式が、画像の濃淡値の時間空間変化にも適用できると仮定して得られる一般的な保存の式は、画像平面上の任意の小領域 δS での濃淡値の総和の時間変化が、濃淡値の流入、流出速度と発生速度の和に等しいと考えて得られる [11].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\delta S} \rho \, dS = - \oint_{\delta C} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dC + \int_{\delta S} \phi \, dS \quad (1)$$

ここで、 $\rho(x, y, t)$ は空間座標 (x, y) の時刻 t における濃淡値、 δC は δS を囲む閉曲線、 \mathbf{v} は濃淡パターンの運動ベクトル ($\mathbf{v} = (u, v)$)、 \mathbf{n} は δS の外向き法線ベクトル、及び ϕ は単位時間当りの濃淡値の生成消滅量を表す。観測領域を固定することにより上式は非積分関数のみで表せ、拡張した勾配法の基本式 (微分形) を得る。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \operatorname{div}(\mathbf{v}) - \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}(\rho) + \phi \quad (2)$$

式 (1) 及びその微分形の式 (2) が著者らが提案してきた不均一照明の影響をも考慮した速度場検出法の基本となる拘束条件である。ここで、式 (2) において、 ϕ の要因として、速度場の発散 ($\operatorname{div}(\mathbf{v})$) を伴うような物体運動 (カメラの光軸に平行な奥行き方向の運動) や、照明の時間空間的不均一の影響が考えられる。ここでは、 $\operatorname{div}(\mathbf{v}) = 0$ を仮定して、以下の議論を行う。

b) オプティカルフローとイメージフロー

本節では、濃淡値の対応付けに基づく従来の勾配法の基本式と、(2) 式に定義した濃淡値の保存則に基づく基本式との関連について論議する。

式 (2) において $\phi = \rho \operatorname{div}(\mathbf{v})$ と仮定すると、Horn, Schunck の提案した速度ベクトル (オプティカルフロー) の基本式が得られる [4].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}(\rho) = 0 \quad (3)$$

ここで、Horn, Schunck の提案した基本式の導出を紹介する。時刻 t において座標 (x, y) にある濃淡パターンが、 δt 後に座標 $(x + \delta x, y + \delta y)$ に、濃淡分布を一定に保ったまま移動したとき、その対応付けから次式が成り立つ。

$$\rho(x, y, t) = \rho(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) \quad (4)$$

ここで、右辺をテーラー展開し、二次以上の項を微小として無視する。その式を δt で割ると

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\delta x}{\delta t} + \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\delta y}{\delta t} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

となる。勾配法では δt が無限小の場合を考えているので $\delta t \rightarrow 0$ とすると、式 (3) を導くことが出来る。これにより、濃淡の時間・空間勾配と速度ベクトル成分が関係付けられ、もう一つ何らかの拘束条件を付加することで画像中の二次元速度場 (オプティカルフロー) が決定される。この手法は、物体運動の濃淡分布が不変であるという仮定の下での対応付けによる検出法であり、照明の時間・空間的な変化を伴う三次元空間を運動する対象を捉える場合には、求まる見かけの速度場は実際の三次元運動の射影二次元ベクトル場とは大きく異なる。これに対して著者らの提案した式 (1), (2) では、固定された観測領域での濃淡値の保存則を用いており、この式には三次元空間中の照明変化を反映した観測領域での濃淡値の生成・消滅の項と速度ベクトルの項が分離されている。このため、照明変化の影響を受けない三次元運動を射影した真の二次元速度場 (Singh の提案 [1] に従い、以後イメージフローと呼ぶ) が決定できる。ここで式 (2) に対して以下のようなモデルを仮定した。

(2) 照明の空間的不均一性を考慮したモデル

三次元空間を投影した二次元画像中の濃淡パターン $\rho(x, y, t)$ は、一定照明下における仮想濃淡値 $g(x, y)$ と、照明の時間空間変化の影響による濃淡値の変化分 $r(x, y, t)$ の 2 つの項の積で表現できるとするモデルを仮定し、 $\rho = rg$ と表す。ここで、 g は物体表面の拡散反射率分布、また r は照明の不均一分布とみなすことができる。(2) 式に $\operatorname{div}(\mathbf{v}) = 0$ の仮定と共にこれらを適用すると次式を得る。

$$g \left\{ \frac{\partial r}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}(r) \right\} + r \left\{ \frac{\partial g}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}(g) \right\} = \phi \quad (6)$$

ここで $g(x, y)$ では照明の影響による輝度の生成消滅を考慮する必要がなく、物体は濃淡分布を一定に保ったままカメラの光軸に垂直に移動すると考えると、

$$\frac{\partial g}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}(g) = 0 \quad (7)$$

となり次式を得る。

$$g \left\{ \frac{\partial r}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}(r) \right\} = \phi \quad (8)$$

ここでは、画像の照明による影響は時間的に定常で、空間的にのみ変化すると仮定する。従って、 $r = r(x, y)$ と表せ、 $\partial r / \partial t = 0$ より

$$\phi = g \{ \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}(r) \} = \rho \frac{\mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}(r)}{r} \quad (9)$$

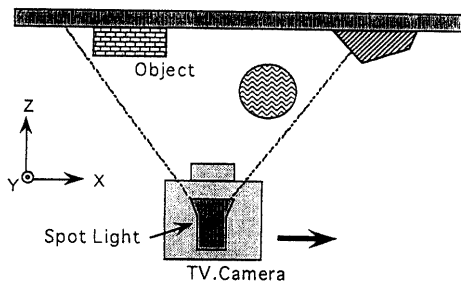


図1: 移動TVカメラに搭載された光源と対象物体のモデル

ここでベクトル $p = grad(r)/r$ とおき、 v と p のなす角度を α とすると

$$\begin{aligned} \phi &= \rho v \cdot p = \rho |v| |p| \cos \alpha \\ &= \rho \sqrt{u^2 + v^2} |p| \cos \alpha \end{aligned} \quad (10)$$

$q = |p| \cos \alpha$ とおき q を未知定数とすると、最終的に室内の照明の空間的不均一性を考慮した拘束条件式^[4]を得る。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \cdot grad(\rho) = \rho q \sqrt{u^2 + v^2} \quad (11)$$

この式では決定すべき未知のパラメータはイメージフローの2成分 (u, v) の他に照明の不均一性を代表する q の3つである。

a) 夜間作業ロボットの視覚の獲得

さて、(11) 式を適用できる状況は、従来の提案 [5] では空間的不均一照明下において、静止したTVカメラの前を物体が等速並進運動する場合である。しかし不均一照明下を運動する物体の形状検出のためには、オプティカルフローの情報に加えて、運動物体の真の移動速度あるいは運動物体とTVカメラの距離に関する情報が必要である。一方、TVカメラが移動しながら静止物体の奥行き計測をする場合、静止物体の表面は空間的不均一照明の影響を受けない、すなわち、室内照明下のように、与えられた空間的不均一照明下ではTVカメラと対象物体の相対速度が同じでも、どちらが移動するかで照明の影響は全く異なる。従来の提案 [5] ではこうした具体的な考察はされていない。ここでは新しい提案として、図1に示すようにTVカメラが照明を搭載して対象物体を照らしながら移動し、その奥行き計測を行なうモデルを考える。このモデルでは、不均一照明下を移動する物体を、静止したテレビカメラで捉える場合と相対的に等しく、(11) 式を利用することができる。この場合、TVカメラの移動速度 (v_0) が既知であり、照明の無い暗い世界(夜間)において、テレビカメラ自らが物体を照らしながら形状

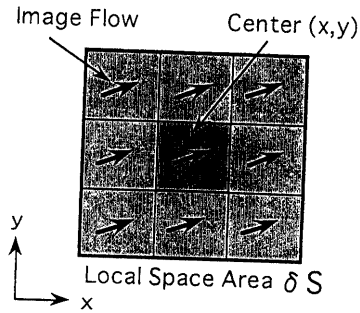


図2: フローの空間的な局所定常性の仮定

計測を行なうことが可能であると考えられる。後にシミュレーション画像を用いた検証結果を示す。

(3) 誤差関数の設定領域の時空間選択法

ここでは、先に取り上げたオクルージョン、多重フロー問題の一部を解決するものとして以下のような手法を提案する。

a) 勾配法による速度場検出

動画画像中の各点において得られる勾配法の式には、イメージフローの2成分 (u, v) やその他の未知数 ϕ や q が含まれている。これらを実際に求めようとすれば、求める未知数の個数以上の方程式数が必要である。そこで通常、未知数以上の方程式をたて、最小自乗法を用いて過剰優決定方式 (over deterministic) で解くために、以下に示すようないくつかの付加的な拘束条件を用いなければならない。

- 空間的局所最適化法:

図2のように画像平面上の局所領域 δS を考えて、この δS 中でイメージフローが一定であると仮定する。すなわち

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (in \delta S) \quad (12)$$

と仮定する。 δS 中の各画素で求まる勾配法の複数個の拘束条件式はすべて同じ解 (イメージフローの値) をもつと仮定しているので、最小自乗法を用いる場合、時刻 t における誤差関数 E は次式で表せる。ただし、イメージフローを決定する空間座標 (x, y) は領域 δS の中心座標とし、説明を簡単にするため $div(v) = \phi = 0$ を仮定する。

$$E = \sum_{l=-L}^L \sum_{m=-M}^M \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} \right\}^2 \quad (13)$$

最小自乗法の考え方により、 $\partial E / \partial u = 0$ 、 $\partial E / \partial v = 0$ の2つの条件より、イメージフローの速度成分 u, v が求まる。これは少ない画像枚数より、瞬間的なイメージフローを決定するのに有効な手法である。

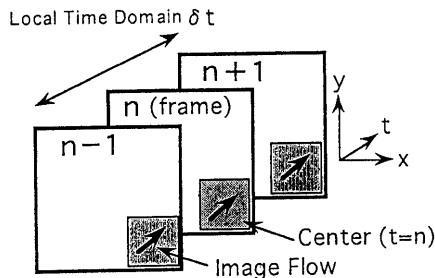


図 3: フローの時間的な局所定常性の仮定

• 時間的局所最適化法:

先のイメージフロー場の空間的な一様性の仮定に対して、次式のような時間的定常性を仮定することもできる。(図3参照)

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (in \delta t) \quad (14)$$

上記の仮定が満足される、時刻 t を中心とした前後各 $N(\text{frame})$ の動画を想定する。このとき座標 (x, y) でのイメージフローの誤差関数 E は次式で表せる。

$$E = \sum_{n=-N}^N \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} \right\}^2 \quad (15)$$

空間的局所最適化法と同様に、 $\partial E / \partial u = 0, \partial E / \partial v = 0$ の2つの条件より、イメージフローの速度成分 (u, v) が求まる。これは各画素ごとに独立に決定できるため、空間的に高い解像度が保て、時間的に定常なイメージフロー場の解析に適する。現実の画像ではイメージフローの長時間にわたる定常性や、広い空間領域における一様性が満たされることは少ない。比較的せまい時間領域でのイメージフローの局所一様性の仮定がより現実的である。以上、従来提案してきた拡張勾配法の基本式、及びその具体的解法を紹介した。以下に本論文で新たに提案する手法を説明する。

b) 時空間選択法の提案

物体の境界付近には奥行きが急激に変化する。この部分のイメージフローを計算する際、前述した空間的、及び時間的局所最適化法を用いると、(12),(14)式の仮定が満足されず、偏微分方程式の解が大きな誤差を生じる。また、観測領域を固定した場合、物体境界付近では、その物体と背景の二重のフローが存在することになる。ここでは、カメラがその光軸に対して垂直に等速並進運動している状況下で得られる動画において、こうしたノイズや二重フローの問題を低減するために誤差関数の設定領域を時間的、空間的に選択する方法を提案する。

まず時間的に速度場が一定とみなす領域の選択法

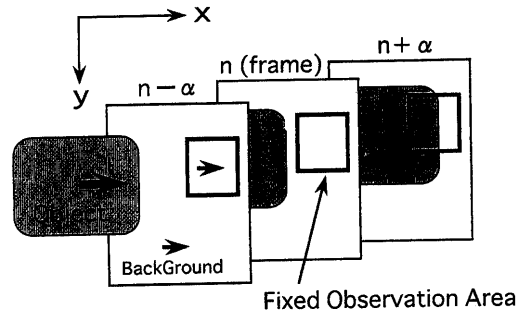


図 4: 時間変化による固定観測領域への物体境界の進入状況

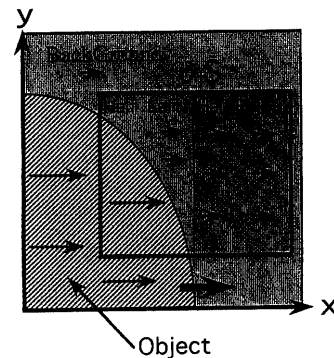


図 5: 微小観測領域 δS 内での物体境界の有無

について議論しよう。画面を横切る物体が n 番目のフレームにおいて図4の状態であれば、固定観測点に $n+\alpha$ 数フレームには物体境界が進入し、領域内に二重のフローが存在して、領域全体の速度成分が激しく変化する。この場合、時間的にイメージフローが定常と仮定した時間的局所最適化法をそのまま用いれば計算誤差が大きくなると予想される。逆に n -数フレームでは物体境界は観測点に到達していないので、この間のイメージフローは一つで、速度場はほぼ一定とみなせ計算誤差が小さいと予想される。つまり、ある時間を境にして前半と後半との誤差関数を各々計算し、誤差の小さい方の関数を満たすイメージフローを採用すれば観測領域内の二重のフローのうちどちらか一つを選択することになり、物体境界の流入、流出による速度成分の急な変化に対応できる。具体的には、次式のように2つの評価関数を用いて、最小自乗法により解候補 (u_1, v_1) 及び (u_2, v_2) を決定し、より小さな2乗誤差を与える方の解候補 (u, v) を解の推定値として選択する。

$$E1 = \sum_{n=-N}^W \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_1 \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_1 \frac{\partial \rho}{\partial y} \right\}^2 \quad (16)$$

$$E2 = \sum_{l=-W}^N \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \right\}^2 \quad (17)$$

但し $\rho = \rho(x, y, t + n)$, $u = u(x, y, t)$, $v = v(x, y, t)$, w は整数であり、 $w=0$ ならば $E1, E2$ は時間的に前半と後半に完全に分かれるが、 w の値を増やせばその分だけ時間的に $E1, E2$ で用いるフレームが重なることになる。

次に空間的な選択法について考える。 n 番目のフレームの画像が図5のような状態であれば、観測点の右半分の方が物体境界を含む左半分より計算誤差が小さいと予想される。それは、領域 δS 内ではイメージフロー一定と仮定する空間的局所最適化法の性質上、イメージフローが一定と見なせる限り広い領域を採用した方が計算誤差が小さいからである。つまり時間選択と同様に、誤差関数がより小さくなる領域の速度をその位置での真のイメージフローとして採用すればよい。このときには

$$E1 = \sum_{l=-L}^S \sum_{m=-M}^M \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_1 \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_1 \frac{\partial \rho}{\partial y} \right\}^2 \quad (18)$$

$$E2 = \sum_{l=-S}^L \sum_{m=-M}^M \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \right\}^2 \quad (19)$$

の2つの評価関数を設定し、より小さな2乗誤差を与える解を推定値とした。但し $\rho = \rho(x+l, y+m, t)$, S は整数で、 x 方向における $E1, E2$ の空間的重なりを示す。

以上の計算を画面全体について行なえば、物体境界（特に、進行方向）部分での二重フローによる計算誤差を軽減できると思われる。又、誤差関数の性質によっては、時空間両方の選択を組み合わせても良い。本手法は誤差関数自身の変形を必要とせず、シーンに対する知識から速度一定とみなせる領域を適切に選択し解析誤差を小さくするものである。

3. シミュレーション画像の解析

今回提案した各手法の有効性を、2種類のシミュレーション動画像を用いて検証する。1つめの動画像は図6に示したように球が画面左から右（ x 軸方向）へ等速並進運動をしており、同時に背景も球と同方向に動いているものである。また、球面も背景も各々空間周波数の異なる模様を持つものとした。この画像では均一照明下の映像を想定しており、拡張した基本式中の発散項は存在しない。球面上のフローは $0.35 \sim 0.6(\text{pixel}/\text{frame})$ とし、奥行きによって速度が変化する。又、背景は奥行きが一定という条件とするため、移動速度は背景中の全点で $0.13(\text{pixel}/\text{frame})$ とした。2つめの動画像は、TVカメラに搭載した光源により照らし出されたシミュレーション画像とするため、図7の様に、1つめの動画像に正弦波状空間パターンを

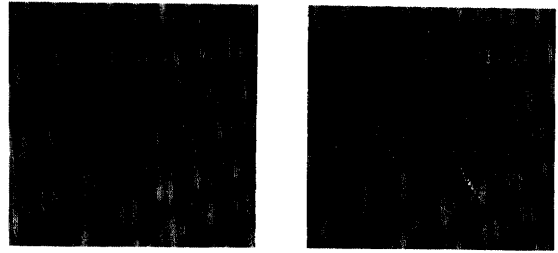


図6: 均一照明下のシミュレーション動画像

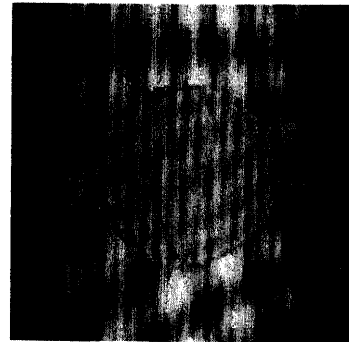


図7: 空間的不均一照明下のシミュレーション動画像

を用いて、画面中央から左右に次第に暗くなる空間的不均一画像を作成した。なお、シミュレーションの対象とした半球面の奥行き分布の理論形状は、与えた速度分布から共に図8のようになる。

(1) 時空間選択局所最適化法の検証

今回提案した時空間選択法を検証するために、(2)式より発散、生成消滅項を除いた勾配法の式 ($\text{div}(v) = \phi = 0$) を用いて一定照明下のシミュレーション動画像に適用した。ここで時空間の両方で誤差の選択を行なえば、物体境界付近のノイズはより小さくなると考えられるので、時空間領域での局所最適化法を用いて、次式を最小にする速度成分 u, v を計算した。

$$E = \sum_{l,m,n} \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} \right\}^2 \quad (20)$$

但し、 $(-2 \leq l, m \leq 2, -3 \leq n \leq 3)$, $\rho = \rho(x+l, y+m, t+n)$, $u = u(x, y, t)$, $v = v(x, y, t)$ である。

時空間選択法を用いたものと、そうでないものの結果を図9、図10に示す。図より明らかに時空間選択法を適用したものは、運動方向の物体境界付近のノイズが低減されており、奥行き変化の激しい領域の誤差改善に有効であると言える。ただ、最適化に用いる領域の時空間選択を行なったため、物体運動境界の存在しない領域での解析精度が多少悪くなっている。解析対象の領域に応じて、最適化に用いる時空間領域の選択

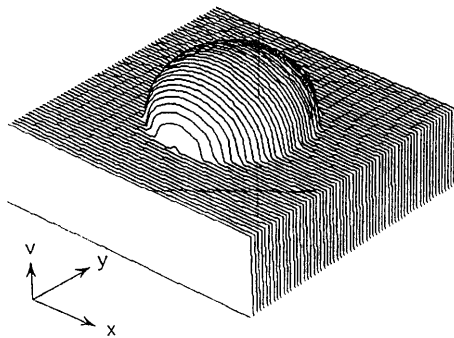


図 8: シミュレーション動画像におけるイメージフローの速度分布図

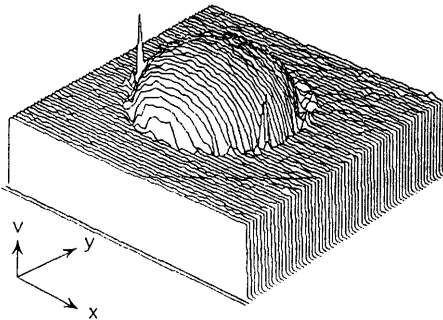


図 9: 従来（時空間局所最適化法）の解析結果

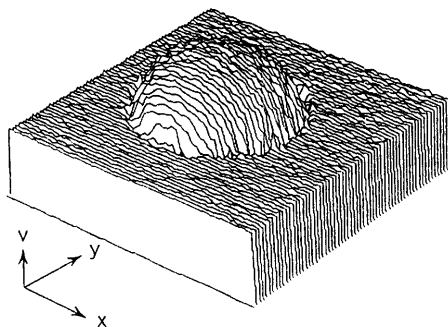


図 10: "時空間選択法"を利用した解析結果

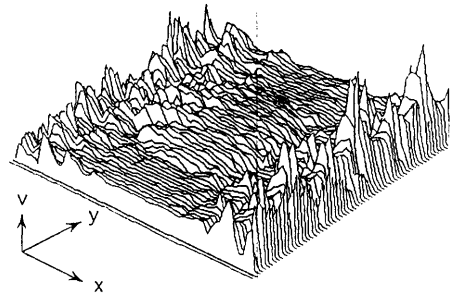


図 11: 生成消滅項を持たない拡張された基本式による、空間的不均一照明下の動画像（図 7）の解析結果（オプティカルフローの推定）

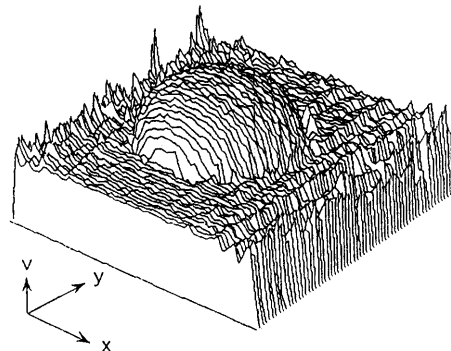


図 12: 生成消滅項を持つ拡張された基本式による、空間的不均一照明下の動画像（図 7）の解析結果（イメージフローの推定）

を行なうか否かを判定する必要がある。

(2) 不均一照明下の画像

次に、照明を搭載した移動TVカメラが捉えたシーンを想定したシミュレーション動画像を用いて、生成消滅項を持つ拡張された基本式(11)の有効性の検討を行なった。まず、生成消滅項を持たない拡張された基本式を用いた計算結果を図11に示す。得られた結果は理想図の形状(図8)とは大きく異なる。その中でも、照明の光量が空間的に激しく変化している画面の左右両端では、フローの大きな乱れが観測される。一方、(11)式(空間的不均一照明下の影響に対応したイメージフローの基本式)から得られた次式の誤差関数を用いて同様の動画像を解析した。

$$E = \sum_{n=-N}^N \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} u + \frac{\partial \rho}{\partial y} v - \rho q \sqrt{u^2 + v^2} \right\}^2 \tag{21}$$

図12に示すように、図11の結果と比べ大幅に改善されたと言える。なお、図12の結果は、局所最適化に用いる誤差関数の設定領域の時間選択法をあわせて採用している。

4. むすび

動画像から3次元情報を検出するにあたり、勾配法を基本とするいくつかの提案を行なった。今回のシミュレーション実験により、拡張された勾配法の基本式が、不均一照明下における3次元物体の復元に有効であることが確認できた。ところで、室内をモデルとした空間的な照明の不均一に対応させる場合、評価関数の性質上、解を導く方程式の数を増やすためイメージフローの時間的定常性を仮定しなければならない問題がある。図9では10枚の動画像を用い、時間的局所最適化法によりイメージフローを算出した。理論値に近い立体形状を得るため、解析に用いるフレームの枚数を増やしすぎると、物体が移動する分、形状が移動方向にのびてしまう。このため現在は、計算に用いるフレーム数と解の精度に適切な妥協を強いられている。又、評価関数に変形を必要としない時空間選択法は、照明の影響の有無にかかわらず、特に物体境界部分の突発的な誤差を軽減させることが確認できた。

参考文献

- 1) A. Singh, "Optical Flow Computation : A Unified Perspective," IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 1991.
- 2) 金谷健一, "画像理解(3次元認識の数理)," pp.28-132, 森北出版, 東京, 1990.
- 3) S.T. Barnard, W.B. Thompson, "Disparity Analysis Of Images," IEEE Trans. Patten Anal. Mach. Intell., PAMI-2,4, PP.333-340, 1980.
- 4) B.K.P. Horn, B.G. Schunck, "Determining Optical Flow," Artificial Intell., 17, pp.185-203, 1981.
- 5) A. Nomura, H. Miike, K. Koga, "Determining motion fields under non-uniform illumination," Pattern Recog. Letters, 16, 285-296, 1995.
- 6) E. Dubois, J. Konrad, "Estimation of 2-D Motion Fields from Image Sequences with Application to Motion Compensated Processing," in "Motion Analysis and Image Sequence Processing," eds. M.I. Sezan and R.L. Lagendijk, (Kluwer Academic Publishers, pp.53-87, 1993.
- 7) A. Verri, F. Girosi, V. Torre, "Differential Techniques for Optical Flow," J. Opt. Soc. Amer. A7, pp.912-922, 1990.
- 8) 野村 厚志, 三池 秀敏, 横山 悦朗: "動画像からの運動・拡散現象の検出", 電学論 C, 115 巻 3 号, 1995.
- 9) 志沢 雅彦, 間瀬 健二, "多重オプティカルフロー(基本拘束方程式と運動透明視・運動境界検出の統一計算理論)," 信学論 (D-II), J76-D-II, 5, pp.987-1005, May. 1993.
- 10) 古賀和利, 三池秀敏, "動画像の時空間相関に基づくオプティカルフローの解析," 信学論 (D-II), J72-D-II, 4, pp.507-516, 1989.
- 11) A. Nomura, H. Miike, K. Koga, "Field Theory Approach for Determining Optical Flow," Pattern Recognition Letters, 12, pp.183-190, 1991.
- 12) 武川 直樹, "動画像からの光源情報復元," 信学論 (D-II), J74-D-II, 1236, Sept, 1991.
- 13) 乾 敏郎, "視覚情報処理の基礎," サイエンス社, pp.140-170, April. 1990.

(1996.4.15 受理)

RECOVERING 3D-SHAPE FROM MOTION STEREO UNDER NON-UNIFORM ILLUMINATION

Tomoyuki KUDOU, Takafumi HARA, Hidetosi MIIKE, Atusi NOMURA

A reliable and precise estimation of image flow is important for recovering 3D-shape in motion stereo. In the actual scene analysis, the influence of non-ideal conditions such as non-uniform illumination and occlusions should be taken into account to determine the image flow field. In this paper, we discuss a vision system for moving robot carrying an illuminator source in the night. Several ideas to extend the gradient-based method, which is designed for determining optic flow, are tested to estimate the image flow. These are 1) an extended constraint equation considering non-uniform illumination, and 2) selection of space-time boundary in the local optimization technique considering the occlusion problem in motion boundary. The effectiveness of the proposed method is confirmed by utilizing simulation image sequence.